

# 西兰花切块去芯机构设计与试验

陈建能<sup>1,2</sup> 陈礼群<sup>1</sup> 夏旭东<sup>1,2</sup> 肖达度<sup>1</sup> 韩瑞祥<sup>3</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;  
3. 浙江金火机床有限公司, 杭州 311400)

**摘要:** 为了解决西兰花均匀、高效切块问题,在分析西兰花切块去芯理想轨迹基础上提出西兰花切块去芯机构,建立了运动学分析模型,开发了计算机辅助优化软件,并得到一组满足轨迹要求的机构参数。进行了机构的动力学仿真,仿真轨迹与理论优化轨迹基本一致,机构运动平稳,无受力过载现象。设计了西兰花切块去芯生产线,并进行高速摄像试验,试验结果与理想轨迹、仿真轨迹基本一致,刀具可适应满足出口要求的所有尺寸的西兰花切块,验证了西兰花切块去芯机构设计的合理性和优化的正确性;同时进行切块、去芯试验,切块成功率达91%,去芯成功率为100%,满足市场上西兰花小块的加工要求。

**关键词:** 西兰花; 切块去芯机构; 优化设计; 试验

**中图分类号:** S226.9    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0315-08

## Design and Experiment of Cutting and Throwing Head Mechanism of Broccoli

CHEN Jianneng<sup>1,2</sup> CHEN Liqun<sup>1</sup> XIA Xudong<sup>1,2</sup> XIAO Dadu<sup>1</sup> HAN Ruixiang<sup>3</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China  
2. Zhejiang Main Laboratory of Planting Equipment Technology, Hangzhou 310018, China  
3. Zhejiang GFIR Machine Tool Co., Ltd., Hangzhou 311400, China)

**Abstract:** Currently in the industry, artificial broccoli cutting is used for the time being. The efficiency is low, and now mechanical device is needed to solve this problem. The broccoli cutting and throwing core mechanism was put forward. The working principle of broccoli cutting and throwing head mechanism was analyzed, the kinematic model was established, the computer aided optimization software was developed and a set of structural parameters was obtained to meet the trajectory requirements. The dynamics simulation of the mechanism was carried out. The simulation trajectory was basically consistent with the theoretical optimization trajectory. The mechanism motion was stable and there was no force overload phenomenon. The design of the physical prototype was completed and the high-speed photographic movement experiment was conducted. The prototype test results were basically consistent with the ideal trajectory, and the cutting tool was suitable for cutting broccoli in all sizes to meet export requirements, which verified the rationality of the design of broccoli cutting stem and throwing head mechanism. The cutting stem and throwing head tests were completed on the test bench, the success rate of cutting was 91%, success rate of throwing head was 100%, and the export requirements of broccoli small pieces on the market were met, which verified the feasibility of the broccoli cutting and throwing head mechanism.

**Key words:** broccoli; cutting stem and throwing head mechanism; optimization design; experiment

## 0 引言

鲜切西兰花又称切割西兰花,是以新鲜西兰花

为原料,经挑选、整理、去皮、去芯、切分、杀菌、包装等一系列处理,使产品仍然保持新鲜状态,供消费者、餐饮业直接烹饪<sup>[1-3]</sup>。文献[4]统计显示

2009—2015年期间我国鲜或冷藏的西兰花出口量由5.5万t逐渐上升至12.95万t,并且仍处上升趋势。出口的西兰花小块要求长度为3~5cm,大小均匀,切口面积小。欧洲、美国以及日本等已经实现机械化切块,但大多为单独切块、没有去芯,切块机构运动轨迹为直上直下,导致切好的小花与剩余的大茎混合一起,需要人工分拣。美国Charlie公司设计了一款气动西兰花切块机,刀具为半球形,工作时绕固定轴旋转对西兰花进行切块,轨迹为半球,而西兰花的花苞形状大多不是规则的半球状,所以导致西兰花切块不均,有大有小,需要人工二次切块,效率不高<sup>[5-11]</sup>。国内对西兰花的切块装置研究较少,西兰花切块一直由人工完成。综上所述,现阶段西兰花切块设备存在着切块不均、需二次加工或需人工分拣的问题,影响切块的加工效率,因此急需一种能够对西兰花均匀切块并自动去芯的机器。

本文将曲柄摇杆机构与气动连杆机构相结合,提出一种同时满足茎芯分离与切块均匀的西兰花切块去芯机构,并编写机构优化设计软件,进行参数优化,使西兰花切块去芯机构能满足西兰花理想切块尺寸的轨迹要求,同时实现在摇杆极限位置的一端进行切块、另一端进行抛茎,避免切块不均及花、茎混合的问题。

## 1 西兰花切块去芯理想轨迹及其实现机构

### 1.1 西兰花切块去芯的理想轨迹方程

出口市场对西兰花切块的尺寸要求是3~5cm。为了满足这一要求,在机械化切块过程中,切刀必须沿着理想的轨迹。本文通过试验统计的方法得到理想轨迹,首先对采集回来的“浙青95号”西兰花进行对半切开,在西兰花的切面上量取距离小花花苞4cm处,并且做上标记点,如图1所示,然后取西兰花花苞最顶端作为坐标原点,西兰花中心线为y轴,水平方向为x轴,测量标记点的坐标值记录下来并用散点图表示,如图2所示。

根据记录的数据点坐标进行曲线拟合,得到理



图1 西兰花理想切块轨迹取点包络图

Fig. 1 Envelope of ideal tangential locus of broccoli

想切块轨迹为 $y = 0.0277x^2 + 0.0116x + 40$ ,从而为后续西兰花切块去芯机构参数优化提供目标。

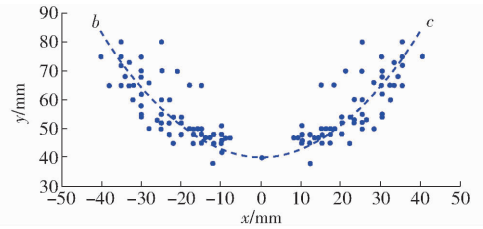


图2 西兰花理想切割包络线

Fig. 2 Ideal trajectory map of broccoli

### 1.2 机构工作原理及作业轨迹与姿态分析

#### 1.2.1 工作原理

西兰花切块去芯机构是西兰花切块机的核心部件,如图3所示。该机构的传动部分是由曲柄摇杆机构和由气缸驱动的八杆机构组合而成的十一杆机构,其工作原理为:动力由旋转电动机传递给曲柄使其做匀速旋转运动;在曲柄的带动下,摇杆带动气缸驱动的八杆机构绕固定铰链点K摆动,当摇杆摆动至切块位置时,气缸活塞杆开始动作,推动三角杆做平面运动,三角杆推动两个刀具拉杆向下运动,刀具拉杆推动左、右刀具做切块运动,摇杆的摆动与刀具切块运动的合成,形成了刀具的特定西兰花切块轨迹。当摇杆摆动至另一极限位置时,同时气缸往复动作,刀具张开,刀具内的西兰花芯由于惯性做抛体运动,抛掷至回收装置。该机构一个运动循环完成切块、去芯和抛掷的动作,结构简单、效率高。

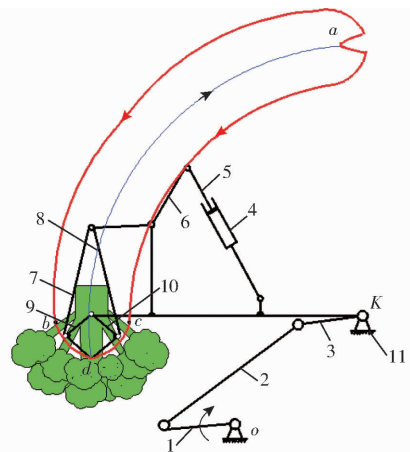


图3 西兰花切块去芯机构运动轨迹

Fig. 3 Motion track of broccoli cutting stem and throwing core mechanism

1. 曲柄 2. 连杆 3. 摇杆 4. 气缸缸体 5. 气缸活塞杆 6. 三角杆 7、8. 刀具拉杆 9. 左刀具 10. 右刀具 11. 机架

#### 1.2.2 轨迹与姿态分析

西兰花切块去芯机构一个工作循环,其刀具末端运动形成的轨迹如图3所示,在初始位置点d时,两片刀具处于闭合状态,曲柄按逆时针方向转动,刀

具在  $a$  点开始张开,而后随摇杆机构一起至极限位置后返回向下运动到  $b$ 、 $c$  点时,气杆开始伸出,推动刀具闭合对西兰花进行切块,刀具直径(最大张口之间距离) $d$  必须满足  $d \geq l_{bc}$ ,由西兰花理想切块轨迹可得  $l_{bc} = 80 \text{ mm}$ ,由文献[5]可知西兰花出口验收时花球最大横径  $D \leq 150 \text{ mm}$ ,切块尺寸最小  $30 \text{ mm}$ ,所以刀具直径  $d \leq 90 \text{ mm}$ ,为了适应更多的西兰花尺寸,取刀具直径为  $90 \text{ mm}$ 。要完成对西兰花的均匀切块则需要使刀具末端沿着  $bd$  与  $cd$  段进行切块,由于切块动作与摇杆动作同时进行,且切块结束时摇杆运动会对切好的西兰花有向下冲击作用,使西兰花小块分离,切块效果更好。切块结束后摇杆回程,刀具仍处于闭合状态,挟带被切下的主茎芯沿  $da$  段轨迹运动至  $a$  点,刀具开始张开,避免刀具在极限位置抛茎时存在夹茎现象。西兰花茎由于惯性做抛体运动,运动至废料收集装置,曲柄旋转一圈,刀具进入下一次切块的初始状态。

## 2 西兰花切块去芯机构运动学模型建立

如图4所示,以曲柄转动中心  $A$  点为原点,水平方向为  $x$  轴,垂直方向为  $y$  轴建立坐标系,具体建模过程<sup>[12-15]</sup>如下。

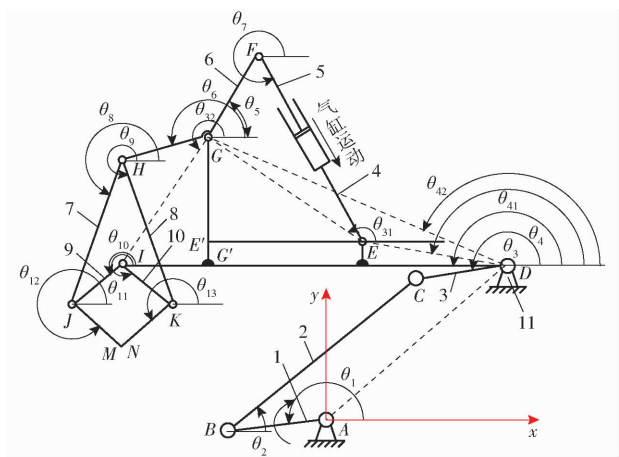


图4 西兰花切块去芯机构简图

Fig. 4 Diagram of broccoli cutting stem and throwing core mechanism

1. 曲柄 2. 连杆 3. 摇杆 4. 气缸缸体 5. 气缸活塞杆 6. 三角杆 7. 8. 刀具拉杆 9. 左刀具 10. 右刀具 11. 机架

### (1) 位置计算

由封闭图形  $ABCD$  可得机构第1个封闭矢量方程

$$l_{AB} + l_{BC} = l_{AD} + l_{DC} \quad (1)$$

式中  $l_{AB}$ ——铰链点  $AB$  之间的距离  
 $l_{BC}$ ——铰链点  $BC$  之间的距离  
 $l_{AD}$ ——铰链点  $AD$  之间的距离  
 $l_{DC}$ ——铰链点  $DC$  之间的距离

将矢量方程写成其复数形式

$$l_{AB}e^{i\theta_1} + l_{BC}e^{i\theta_2} = l_{AD}e^{i\theta_3} + l_{DC}e^{i\theta_4} \quad (2)$$

式中  $\theta_1$ ——杆  $AB$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_2$ ——杆  $BC$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_3$ ——铰链点  $AD$  之间连线与  $x$  轴的夹角

$\theta_4$ ——杆  $CD$  与  $x$  轴的夹角

将方程(2)实部与虚部分离得到

$$\begin{cases} l_{AB} \cos \theta_1 + l_{BC} \cos \theta_2 = l_{AD} \cos \theta_3 + l_{DC} \cos \theta_4 \\ l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BC} \sin \theta_2 = l_{AD} \sin \theta_3 + l_{DC} \sin \theta_4 \end{cases} \quad (3)$$

解方程组(3)可得  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  的值。

由封闭图形  $EGF$  可得机构第2个封闭矢量方程

$$l_{EG} + l_{GF} = l_{EF} \quad (4)$$

式中  $l_{EG}$ ——铰链点  $EG$  之间的距离

$l_{GF}$ ——铰链点  $GF$  之间的距离

$l_{EF}$ ——铰链点  $EF$  之间的距离

将矢量方程写成其复数形式

$$l_{EG}e^{i\theta_{31}} + l_{GF}e^{i\theta_5} = l_{EF}e^{i\theta_7} \quad (5)$$

其中

$$l_{EF} = 230 - vt \quad (6)$$

式中

$v$ ——气缸运动速度

$t$ ——气缸运动时间

$\theta_{31}$ —— $EG$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_5$ ——杆  $GF$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_7$ ——杆  $EF$  与  $x$  轴的夹角

将方程(5)实部与虚部分离得到

$$\begin{cases} l_{EG} \cos \theta_{31} + l_{GF} \cos \theta_5 = l_{EF} \cos \theta_7 \\ l_{EG} \sin \theta_{31} + l_{GF} \sin \theta_5 = l_{EF} \sin \theta_7 \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\theta_{31} = \theta_3 - \beta_1 - \beta_4 \quad (8)$$

式中

$\beta_1$ ——杆  $DI$  与  $DC$  的夹角

$\beta_4$ —— $GE$  与  $EE'$  的夹角

解方程组(7)可得  $\theta_5$ 、 $\theta_7$  的值。

由封闭图形  $GHJI$  可得机构第3个封闭矢量方程

$$l_{GH} + l_{HJ} = l_{GI} + l_{IJ} \quad (9)$$

式中  $l_{GH}$ ——铰链点  $GH$  之间的距离

$l_{HJ}$ ——铰链点  $HJ$  之间的距离

$l_{GI}$ ——铰链点  $GI$  之间的距离

$l_{IJ}$ ——铰链点  $IJ$  之间的距离

将矢量方程写成其复数形式

$$l_{GH}e^{i\theta_6} + l_{HJ}e^{i\theta_8} = l_{GI}e^{i\theta_{32}} + l_{IJ}e^{i\theta_{10}} \quad (10)$$

式中  $\theta_6$ ——杆  $GH$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_8$ ——杆  $HJ$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_{32}$ —— $GI$  与  $x$  轴夹角

$\theta_{10}$ ——杆  $IJ$  与  $x$  轴的夹角

将方程(10)实部与虚部分离得到

$$\begin{cases} l_{GH}\cos\theta_6 + l_{HJ}\cos\theta_8 = l_{GI}\cos\theta_{32} + l_{IJ}\cos\theta_{10} \\ l_{GH}\sin\theta_6 + l_{HJ}\sin\theta_8 = l_{GI}\sin\theta_{32} + l_{IJ}\sin\theta_{10} \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} \theta_6 = \theta_5 + j_3 \\ \theta_{32} = \theta_{42} + \beta_3 + \beta_5 \\ \theta_{42} = \theta_3 - \beta_1 - \beta_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中  $j_3$ ——杆  $HG$  与  $GF$  的夹角

$\theta_{42}$ ——杆  $GD$  与  $x$  轴的夹角

$\beta_3$ ——杆  $DI$  与  $GD$  的夹角

$\beta_5$ ——杆  $DI$  与  $GI$  的夹角

解方程组(11)可得  $\theta_8$ 、 $\theta_{10}$  的值。

由封闭图形  $GHIK$  可得机构第 4 个封闭矢量方程

$$l_{GH} + l_{HK} = l_{GI} + l_{IK} \quad (13)$$

式中  $l_{HK}$ ——铰链点  $HK$  之间的距离

$l_{IK}$ ——铰链点  $IK$  之间的距离

将矢量方程写成其复数形式

$$l_{GH}e^{i\theta_6} + l_{HK}e^{i\theta_9} = l_{GI}e^{i\theta_{32}} + l_{IK}e^{i\theta_{11}} \quad (14)$$

式中  $\theta_9$ ——杆  $HK$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_{11}$ ——杆  $IK$  与  $x$  轴的夹角

将方程(14)实部与虚部分离得到

$$\begin{cases} l_{GH}\cos\theta_6 + l_{HK}\cos\theta_9 = l_{GI}\cos\theta_{32} + l_{IK}\cos\theta_{11} \\ l_{GH}\sin\theta_6 + l_{HK}\sin\theta_9 = l_{GI}\sin\theta_{32} + l_{IK}\sin\theta_{11} \end{cases} \quad (15)$$

解方程组(15)可得  $\theta_9$ 、 $\theta_{11}$  的值,则

$$\begin{cases} \theta_{12} = \theta_{10} + \pi + j_2 \\ \theta_{13} = \theta_{11} - \pi + j_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中  $j_2$ —— $IJ$  与  $JM$  的夹角

$\theta_{12}$ ——杆  $JM$  与  $x$  轴的夹角

$\theta_{13}$ ——杆  $KN$  与  $x$  轴的夹角

由于西兰花切块-去芯机构为平面连杆机构,所以构件均做平面运动,由上面的转角关系可计算刀具末端  $M$ 、 $N$  的运动位移方程。 $(x_j, y_j)$  表示构件  $j$  铰链点的坐标,已知

$$\begin{cases} x_A = 0 \\ y_A = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} x_D = 395 \text{ mm} \\ y_D = 240 \text{ mm} \end{cases} \quad (18)$$

则

$$\begin{cases} x_M = x_J + l_{JM}\cos\theta_{12} \\ y_M = y_J + l_{JM}\sin\theta_{12} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} x_N = x_K + l_{KN}\cos\theta_{13} \\ y_N = y_K + l_{KN}\sin\theta_{13} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} x_K = x_H + l_{HK}\cos\theta_9 \\ y_K = y_H + l_{HK}\sin\theta_9 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} x_J = x_H + l_{HJ}\cos\theta_8 \\ y_J = y_H + l_{HJ}\sin\theta_8 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} x_H = x_G + l_{GH}\cos\theta_6 \\ y_H = y_G + l_{GH}\sin\theta_6 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} x_{G'} = x_{G'} \\ y_{G'} = y_{G'} + l_{GG'} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} x_{G'} = x_D + (l_{DI} - l_{G'I})\cos\theta_{41} \\ y_{G'} = y_D + (l_{DI} - l_{G'I})\sin\theta_{41} \end{cases} \quad (25)$$

$$\theta_{41} = \theta_3 - \beta_1 - \beta_2 \quad (26)$$

式中  $\beta_2$ ——杆  $DI$  与  $ED$  的夹角

$l_{DI}$ ——铰链点  $DI$  之间的距离

$l_{GG'}$ ——铰链点  $GG'$  之间的距离

$l_{G'I}$ ——铰链点  $G'I$  之间的距离

$l_{JM}$ ——铰链点  $J$  与左刀具末端  $M$  之间的距离

$l_{KN}$ ——铰链点  $K$  与右刀具末端  $N$  之间的距离

$\theta_{41}$ ——杆  $DI$  与  $x$  轴的夹角

### 3 西兰花切块去芯机构参数优化

#### 3.1 优化模型建立

西兰花切块去芯关键技术一是两切刀运动能否同步,二是两切刀的运动轨迹能否满足西兰花所需的切块理想轨迹要求,因此西兰花切块-去芯机构以此为优化目标<sup>[16-18]</sup>。

##### 3.1.1 优化变量和目标函数

为保证机构末端  $M$ 、 $N$  切块轨迹与理想切块轨迹误差最小和两切刀运动的同步性最好,可用  $x_M$ 、 $y_M$ 、 $x_N$ 、 $y_N$ 、 $x_{IM}$ 、 $y_{IM}$ 、 $x_{IN}$ 、 $y_{IN}$  表示目标函数,其中  $(x_{IM}, y_{IM})$  表示  $M$  点的理想轨迹点,  $(x_{IN}, y_{IN})$  表示  $N$  点的理想轨迹点。

由西兰花的理想切块轨迹得到  $M$ 、 $N$  的理想切块轨迹方程为

$$\begin{cases} y_{IM} = 0.0277(x_{IM} + 74)^2 + 40 & (-124 \text{ mm} \leq x_{IM} \leq -74 \text{ mm}) \\ y_{IN} = 0.0277(x_{IN} + 74)^2 + 40 & (-74 \text{ mm} < x_{IN} \leq -24 \text{ mm}) \end{cases} \quad (27)$$

本文中  $0 \leq i \leq 360$ ,  $i$  表示步数,步长为 1,机构切块入切点为  $i = 340$ ,则当  $340 \leq i \leq 360$  时为机构的切块轨迹。将  $x_{IM}$ 、 $x_{IN}$  的取值范围进行  $n$  等分,  $n = 20$ ,则  $\mathbf{x}_{IM_n} = (x_{IM_1}, x_{IM_2}, \dots, x_{IM_n})$ ,  $\mathbf{x}_{IN_n} = (x_{IN_1}, x_{IN_2}, \dots, x_{IN_n})$ ,  $\mathbf{y}_{IM_n} = (y_{IM_1}, y_{IM_2}, \dots, y_{IM_n})$ ,  $\mathbf{y}_{IN_n} = (y_{IN_1}, y_{IN_2}, \dots, y_{IN_n})$ ,将理想轨迹点与实际轨迹点对应,则

$$\begin{aligned} & (x_{IM_i}, x_{IN_i}, y_{IM_i}, y_{IN_i}) = \\ & \begin{cases} (0, 0, 0, 0) & (0 \leq i \leq 340) \\ (x_{IM_n}, x_{IN_n}, y_{IM_n}, y_{IN_n}) & (340 < i \leq 360) \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

为保证机构末端切块轨迹与理想切块轨迹误差最小,目标函数用  $f_1(x)$  来表示,其表达式为

$$f_1(x) = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_{M_i} - x_{IM_i})^2 + (y_{M_i} - y_{IM_i})^2 + (x_{N_i} - x_{IN_i})^2 + (y_{N_i} - y_{IN_i})^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

其中

$$\begin{cases} x_{M_i} = x_{J_i} + l_{JM} \cos \theta_{12} \\ y_{M_i} = y_{J_i} + l_{JM} \sin \theta_{12} \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} x_{N_i} = x_{K_i} + l_{KN} \cos \theta_{13} \\ y_{N_i} = y_{K_i} + l_{KN} \sin \theta_{13} \end{cases} \quad (31)$$

为保证机构末端切块两刀具的同步性最好, 目标函数用  $f_2(x)$  来表示, 其表达式为

$$f_2(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{M_i} - y_{N_i})^2} \quad (32)$$

从以上方程发现, 优化目标与切块机构中的杆长相关性最大, 选切块机构中的杆长  $l_{GT}$ 、 $l_{GC'}$ 、 $l_{CH}$ 、 $l_{HJ}$ 、 $l_{HK}$  作为变量, 即  $\mathbf{X} = (l_{GT}, l_{GC'}, l_{HG}, l_{HJ}, l_{HK})$ , 优化目标函数为

$$F(\mathbf{X}) = 0.5f_1(x) + 0.5f_2(x) \quad (33)$$

### 3.1.2 约束条件及方程

机架及各杆件的长度都有一定的限制, 可统一表达为

$$X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (34)$$

故添加机构优化的设计约束时, 对自变量的条件限定为

$$\begin{cases} 60 \text{ mm} \leq X_1 \leq 125 \text{ mm} \\ 80 \text{ mm} \leq X_2 \leq 150 \text{ mm} \\ 60 \text{ mm} \leq X_3 \leq 125 \text{ mm} \\ 160 \text{ mm} \leq X_4 \leq 180 \text{ mm} \\ 160 \text{ mm} \leq X_5 \leq 180 \text{ mm} \end{cases} \quad (35)$$

### 3.2 优化软件的编写与初始解的获得

根据上文建立的数学模型, 通过 Matlab 语言编写西兰花切块去芯机构优化设计软件, 如图 5 所示。通过利用软件对西兰花切块机构的结构尺寸、位置、运动状态的模拟, 人工调整参数获得一组初始参数: 刀具半径  $R = 50 \text{ mm}$ , 刃角  $C = 8^\circ$ , 结构参数:  $l_{AB} = 90 \text{ mm}$ ,  $l_{BC} = 430 \text{ mm}$ ,  $l_{DC} = 135 \text{ mm}$ ,  $l_{DI} = 480 \text{ mm}$ ,  $l_{DE} = 100 \text{ mm}$ ,  $l_{GT} = 124 \text{ mm}$ ,  $l_{GC'} = 137.9 \text{ mm}$ ,  $l_{CF} = 135 \text{ mm}$ ,  $l_{CH} = 125 \text{ mm}$ ,  $l_{HJ} = 165.5 \text{ mm}$ ,  $l_{HK} = 162 \text{ mm}$ , 其中,  $l_{DE}$  表示铰链点  $DE$  之间的距离。摇杆旋转中心  $x_D = 398 \text{ mm}$ ,  $y_D = 230 \text{ mm}$ , 曲柄初始安装角  $\varphi = 220^\circ$ ,  $\beta_1 = 7.6^\circ$ , 角杆  $GFH$  中杆  $GH$  与杆  $GF$  夹角  $\lambda = 120^\circ$ 。

### 3.3 优化结果分析

利用自动优化程序进行自动优化, 当遗传算法迭代 60 次, 目标函数值趋于稳定, 60 次以后, 目标函数值不再变化或存在极微小的变化, 说明优化终

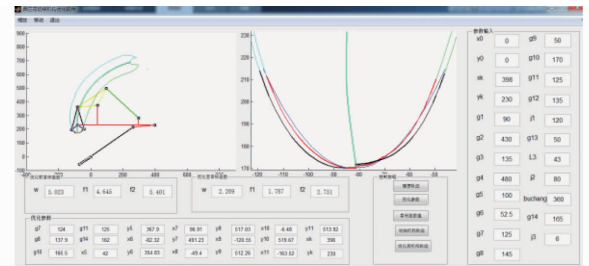


图5 软件的初始界面

Fig.5 Initial interface of software

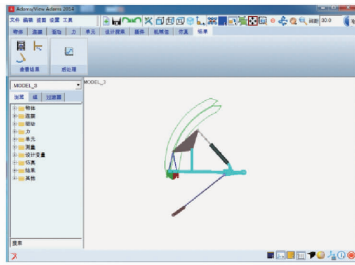
止, 故本文取遗传算法迭代 60 次所得设计变量的值为最终的优化结果, 优化计算结果为  $\mathbf{X} = (124, 137.9, 128.7, 165.5, 162)$ , 目标函数值  $F = 2.269 \text{ mm}$ , 其中: 实际轨迹与理想轨迹误差  $f_1 = 1.787 \text{ mm}$ , 机构末端  $M$ 、 $N$  的运动同步性误差  $f_2 = 2.751 \text{ mm}$ ; 初始解的目标函数值  $F = 5.023 \text{ mm}$ , 其中: 实际轨迹与理想轨迹误差  $f_1 = 4.645 \text{ mm}$ , 机构末端  $M$ 、 $N$  的运动同步性误差  $f_2 = 5.401 \text{ mm}$ 。

与初始条件对应的目标函数相比, 优化计算结果中的两个子目标函数的值都有明显的减小, 其中, 实际轨迹与理想轨迹误差为原来的 38.4%, 优化后机构末端  $M$ 、 $N$  的运动同步性误差为原来的 49.7%, 说明优化后的西兰花切块机构末端切块轨迹的效果要比优化前的机构好。

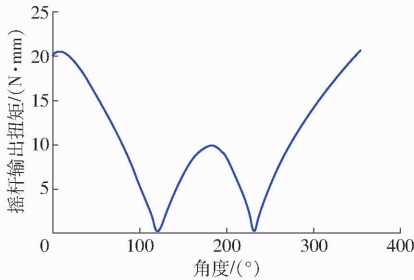
### 3.4 动力学仿真分析

为了验证优化后切块去芯机构轨迹与机构运动的稳定性, 引入 ADAMS 软件建立虚拟样机模型, 并对模型进行轨迹与动力学仿真。首先针对西兰花切块去芯机构的虚拟样机模型建立参数模型, 添加约束, 设置零件材料, 然后添加驱动, 设置运动参数。最后对虚拟模型进行轨迹仿真模拟, 轨迹仿真结果如图 6a 所示, 由图 6 可知, 虚拟样机仿真轨迹与 Matlab 优化轨迹基本一致。

由于整个切块机构从切块位置至抛茎位置的运动是通过摇杆输出的扭矩实现的, 所以与摇杆相连接的轴段承受的扭矩是否超载是机构最关键的性能指标, 因此必须要对这一轴段进行扭转强度的校核。本文对在整个运动过程中的摇杆与轴的连接处的扭矩进行动力学仿真, 结果如图 6b 所示; 由图 6 可知, 在曲柄转动一周内, 轴所受的扭矩在初始时刻与结束时刻时为最大值, 扭矩  $T = 20 \text{ N} \cdot \text{mm}$ ; 轴直径  $d_i = 10 \text{ mm}$ ; 由轴的扭转强度条件:  $\tau_T = \frac{T}{W_T} \leq [\tau_T]$  计算出  $\tau_T = 16.9 \text{ MPa}$ , 其中  $W_T$  为轴的抗扭截面系数。轴的材质采用 45 号钢, 其许用扭转切应力  $[\tau_T]$  为 25 ~ 45 MPa,  $\tau_T < [\tau_T]$ , 所以校核安全, 无受力过载现象, 机构运行稳定。图 6a 所得轨迹与 Matlab 中的优化轨迹一致, 验证了机构的可行性。



(a) 基于ADAMS模型的仿真轨迹



(b) 摇杆输出扭矩变化曲线

图6 基于ADAMS优化模型仿真结果

Fig. 6 Simulation of optimization model based on ADAMS

## 4 西兰花切块去芯试验

### 4.1 西兰花切块去芯生产线设计

西兰花切块去芯生产线简图如图7所示,工作过程:电动机带动链传动装置中主动链轮转动,经链条带动从动链轮;从动链轮与间歇装置中主动不完全齿轮、主动不完全齿轮锁止副用键连接于同一根轴上,从而带动间歇装置运动,间歇装置中主动不完全齿轮运动周期为 $T'$ ,则从动齿轮5运动周期为 $3T'/4$ ,静止时间为 $T'/4$ ;间歇装置中从动齿轮锁止副、从动齿轮与输送装置中的主动输送轮用键连接于同一根轴上,进而驱动输送装置;使输送装置中输送链板进行间歇运动。同时切块去芯机构中的曲柄与主动链轮由同一电动机驱动,两钵盘之间距离为主动输送轮节圆周长。这样保证了曲柄转动一圈完成一个切块、去芯周期,输送链板从动输送轮完成一次间歇运动结束;从而实现流水线作业。试验装置实物图如图8所示。

切块试验选用不锈钢质钵盘固定西兰花位姿,钵盘盘口直径120 mm,底部直径10 mm,钵盘深度40 mm,刀具为直径90 mm的1/4不锈钢质球面刀具,两片刀具分别单边开刃,非刃边与两个特制的刀柄焊接起来,然后对称安装于两个铰链点,通过拉动刀柄使两片刀具分别绕其铰链点旋转,从而达到两刀具刃边重合或分开,如图8a所示。

试验台流水线如图8b所示,采用塑料链板进行输送,钵盘固定于输送链板上,试验采取正常作业模式,流水线开始运动同时切块去芯机构开始作业,流水线的主动轮与切块去芯机构的曲柄由同一电动机

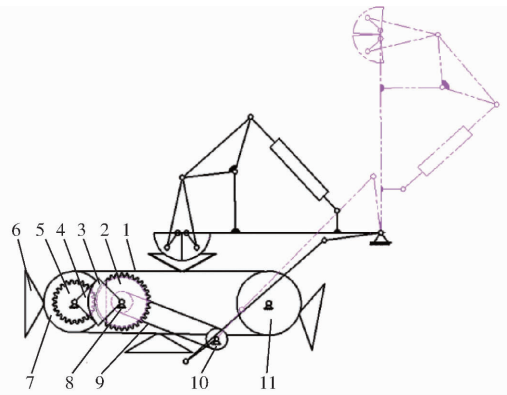
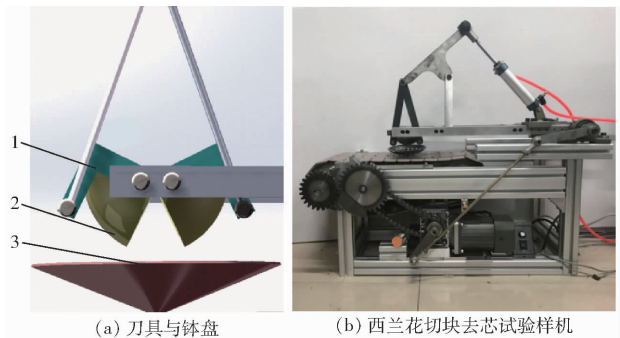


图7 西兰花切块去芯生产线简图

Fig. 7 Production line diagram of broccoli cutting stem and throwing core mechanism

1. 输送链板 2. 主动不完全齿轮 3. 主动不完全齿轮锁止副
4. 从动齿轮锁止副 5. 从动齿轮 6. 钵盘 7. 主动输送轮
8. 从动链轮 9. 链条 10. 主动链轮 11. 从动输送轮



(a) 刀具与钵盘

(b) 西兰花切块去芯试验样机

图8 西兰花切块去芯试验装置

Fig. 8 Test device of broccoli cutting stem and throwing core mechanism

1. 刀柄 2. 刀具 3. 钵盘

驱动以保证两者运动的同步性,两钵盘的距离为流水线主动轮的节圆周长,达到曲柄转动一周完成一次切块、去芯运动周期,同时流水线上主动轮转动一周带动钵盘由上一个运动至下一个,完成一个输送周期。

### 4.2 高速摄像的轨迹测试及分析

为了验证样机是否满足切块理论轨迹要求,必须通过轨迹测试试验获得样机的实际轨迹。高速摄像试验如图9所示。将录制好的视频导入Blaster仪及MAS图像分析软件中,利用图像分析软件获取切块机构旋转1周高速摄像捕获的实际轨迹。通过对比得实际轨迹与理论轨迹基本一致,验证了机构的可行性。

将行业内“D-Core 30i”<sup>[19]</sup>与“气动切块”<sup>[20]</sup>西兰花切块机构与本机构轨迹的入切点设置在同一位置,各轨迹的最低点为切块结束点,对入切点至切块结束点间的轨迹与西兰花理想切块轨迹进行比较,如图10所示。

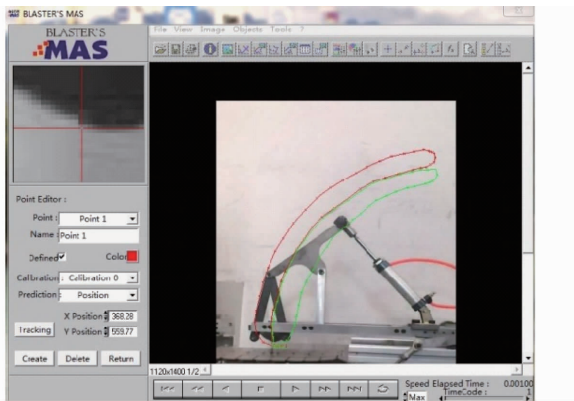


图 9 切块去芯机构刀具末端运动轨迹

Fig. 9 Tool end motion track of broccoli cutting stem and throwing core mechanism

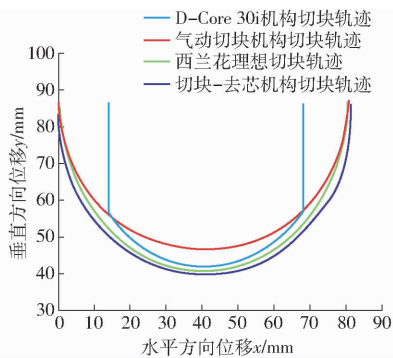


图 10 轨迹对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of trajectories of different mechanisms

可见分级切块机构中第一级切块轨迹与理想轨迹相差很大,易造成西兰花小块损伤与切块的大小不均,降低切块成功率。气动切块机构中半球绕定

轴旋转对西兰花进行切割,其切块轨迹的高度与理想轨迹相差 10 mm 左右,易造成切块不到位,存在大块西兰花,需二次加工,降低切块成功率与工作效率。西兰花切块去芯机构的切块轨迹与理想轨迹几乎一致,保证了满足切块要求的尺寸,提高了切块成功率,同时提高整体工作效率。

### 4.3 西兰花生产线切块试验及分析

为了验证样机的切块的均匀性与高效性,通过切块试验来获得样机的切块性能。试验工作流程如图 11 所示。

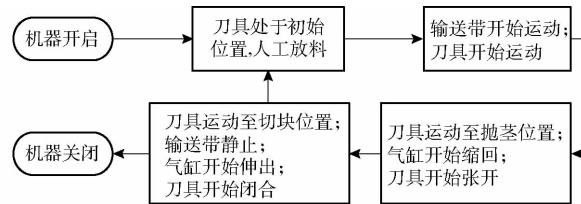


图 11 西兰花切块去芯生产线工作流程图

Fig. 11 Working course of broccoli cutting core mechanism production line

设曲柄转速为 60 r/min,试验选用“浙青 95 号”西兰花品种,人工将西兰花放置于输送带上的钵盘内,试验中切块去芯机构各个关键转角姿态以及切块效果如图 12 所示,曲柄转动一周完成一次切块,一次去芯,切块效果良好,验证了西兰花切块去芯机构设计的正确性与合理性。

切块去芯机构在转速为 60 r/min 下进行 100 朵切块试验,成功切块 91 朵,成功去芯 100 朵。将试验结果与其他切块机构的切块效果进行比较,同时对切块成功率、去芯成功率进行以下定义:切块成功



图 12 西兰花切块去芯机构各关键位置姿态与切块效果

Fig. 12 Main position and cutting effects of broccoli cutting core mechanism

率为满足出口尺寸要求的小块总质量占切块总质量的百分比;去芯成功率为成功去芯个数占切块总个数的百分比。试验得到:Sweere公司<sup>[20]</sup>产品 Floreto 去芯机切块成功率达 80%~90%;去芯成功率达 95%;机器工作效率达 50~60 个/min。Charlie's 公司<sup>[21]</sup>产品气动西兰花切块机切块成功率达 70%~80%;去芯成功率达 90%;机器工作效率 30~40 个/min。本文切块-去芯机切块成功率可达 91%;去芯成功率达 100%;工作效率可达 50~60 个/min。

## 5 结论

(1)提出了一种西兰花切块去芯机构,可依次完成切块、去芯动作,结构简单、效率高。

(2)基于 Matlab 软件开发了切块去芯机构的优化设计软件,优化出一组最优参数,并引入 ADAMS 软件进行了机构的动力学仿真,仿真轨迹与理论优化轨迹基本一致,机构运行平稳,无受力过载现象,满足西兰花切块、去芯最佳轨迹要求。

(3)设计搭建了试验台,并进行高速摄像试验,试验结果与理论轨迹基本一致,验证了切块去芯机构设计的正确性。

(4)在试验台上完成了西兰花切块去芯样机切块试验,在机构转速 60 r/min 下,平均切块成功率为 91%,去芯成功率 100%,工作效率最高达 60 个/min。直径 90 mm 的刀具可以满足所有出口要求的西兰花切块。

## 参 考 文 献

- [1] 何玉池,李云,焦颜成,等. 西兰花出口的现状 & 产业化安全生产研究初探[J]. 现代农业科技,2007(14):12-13. HE Yuchi, LI Yun, JIAO Yancheng, et al. Present situation of the export of broccoli and preliminary study on industrialized safe production[J]. Journal of Modern Agriculture and Technology, 2007(14):12-13. (in Chinese)
- [2] 屈为栋,何道根,苏英京. 台州市西兰花产业现状、存在问题及发展对策[J]. 浙江农业科学,2009(6):1062-1065. QU Weidong, HE Daogen, SU Yingjing. Current situation, existing problems and development countermeasures of broccoli industry in Taizhou City[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2009(6):1062-1065. (in Chinese)
- [3] 赵晓燕. 我国鲜切蔬菜产业中的问题与发展趋势[J]. 中国蔬菜,2011(17):1-3. ZHAO Xiaoyan. Problems and development trend of fresh-cut vegetable industry [J]. Chinese Vegetables, 2011(17):1-3. (in Chinese)
- [4] 智研咨询集团. 2016—2022 年中国其他鲜或冷藏的西兰花行业进出口态势分析及对外贸易前景展望报告(07049020) [R]. 北京:智研咨询集团,2016:26-28.
- [5] SN/T 1610—2005 出口西兰花检验规程附录 A [S]. 2005.
- [6] SWITEK J R, ROBERT E. Apparatus for slicing broccoli and like into appears; US. 5168801 [P]. 1992-12-08.
- [7] ROBERT E, SWITEK J R. Broccoli head trimming apparatus and method; US. 5470602 [P]. 1995-11-28.
- [8] CORNELIUS J. Device for removing a core from harvested heading plants; US. US20110091625 [P]. 2011-04-21.
- [9] HIRRTLE T W, CIMPERMAN F J, SILBERMANN K. Coring apparatus; US. 5074203 [P]. 1991-12-24.
- [10] HINTLE T W. Coring method; US. 5009909 [P]. 1991-04-23.
- [11] SHAW R A. Method for coring cauliflower heads; US. 4241096 [P]. 1980-12-23.
- [12] 李焯健,孙宇,胡峰峰. 多杆高速机械压力机机构优化设计[J]. 中国机械工程,2015,26(1):31-36. LI Yejian, SUN Yu, HU Fengfeng. Optimization design of multi-rod high speed mechanical press mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(1):31-36. (in Chinese)
- [13] 赵匀,刘志平,辛亮,等. 水稻钵苗膜上移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):87-93. ZHAO Yun, LIU Zhiping, XIN Liang, et al. Optimal design and experiment of transplanting mechanism on rice seedling film [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):87-93. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180410&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180410&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.010. (in Chinese)
- [14] 赵雄,崔海洋,代丽,等. 混合驱动五杆花卉盘栽机构的优化设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(15):34-40. ZHAO Xiong, CUI Haiyang, DAI Li, et al. Optimization design and experiment of hybrid drive five-bar flower tray mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15):34-40. (in Chinese)
- [15] 陈新德. 基于 ADAMS 的平面八连杆机构的优化设计和仿真[J]. 机械传动,2015,39(9):113-116. CHEN Xinde. Optimized design and simulation of planar eight-bar linkage mechanism based on ADAMS [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(9):113-116. (in Chinese)
- [16] 刘永祥,臧德江,邹吉祥,等. 基于 MATLAB 的挖掘机四连杆机构优化设计[J]. 工程机械,2018,49(1):33-37,3. LIU Yongxiang, ZANG Dejiang, ZOU Jixiang, et al. Optimization design of four-bar linkage mechanism of excavator based on MATLAB [J]. Construction Machinery, 2018, 49(1):33-37,3. (in Chinese)
- [17] 何俊,冯鉴. 基于 Matlab 的平面连杆机构预定轨迹优化设计[J]. 煤矿机械,2010,31(3):36-39. HE Jun, FENG Jian. Optimization design of planar linkage mechanism based on Matlab [J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(3):36-39. (in Chinese)
- [18] 李启鹏,刘万俊,全崇楼,等. 基于 SolidWorks 运动仿真的平面八连杆机构优化设计[J]. 机械传动,2009,33(1):63-64,67,107. LI Qipeng, LIU Wanjun, TONG Chonglou, et al. Optimal design of planar eight-bar linkage mechanism based on SolidWorks motion simulation [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2009, 33(1):63-64,67,107. (in Chinese)
- [19] <http://www.proj-services.com/products/projx-d-core-cabbagelettuce-coringquartering-machine/> [Z].
- [20] <https://www.sweere.com/en/product/idfloreto/floretting-machine.html> [Z].
- [21] <http://charliesmachineandsupply.com/catalog/broccolifloret.shtml> [Z].